

ISSN: 2821-157X		https://www.jasd.khadu.ir	
	Journal of Aerospace Defense Volume 3, Issue 4 Winter P.P. 101-130		
Research Paper; 			
Investigation of the release and uptake of human-derived radionuclides from the stabilized waste cloud resulting from the nuclear bomb explosion in central Iran Zahra Dehghan Bahabadi¹, Saeed Ghorbani Sehat ² 1 .Master's student, Radiation Health, Faculty of Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran Email: zdehghanb2007@gmail.com 2. Master's degree in Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran Email: saead.gh@gmail.com			
Article Information		Abstract	
Accepted: 2024/09/06 Received: 2025/04/15 Keywords: HYSPLIT, nuclear contaminants, atmospheric dispersion, atomic bomb		This study investigates the emission of radioactive contaminants and the dose received from a hypothetical nuclear bomb explosion in central Iran using HYSPLIT and GDAS data without considering chemical reactions. The results showed that the direction of emission and deposition of radioactive nuclei is mainly northeast and to a lesser extent southeast of the explosion site, and the spread of radioactive materials reaches about 300 km from the explosion site 12 hours after the explosion, and Yazd province, southern areas of South Khorasan, and northern Kerman province are involved. Initially, the plume grows rapidly and reaches an altitude of 5000 meters. Over time, the height of the particles decreases and they deposit more, and the maximum concentration of particle deposition is greater than their emission concentration, and the maximum concentration and deposition of particles is in the northeast of the explosion site, about 200 km from it, where the dose received by humans reaches more than 100 millisieverts. Also, the total dose received by people on the ground at an altitude of 0 meters is greater than the total dose received at an altitude of 0 to 100 meters. Over time, the concentration of the atomic cloud decreases, and as a result, the dose received by people also decreases. The dose received by people is often much higher than the permissible limit set by the International Commission on Radiological Protection (ICRP). In terms of radioactivity, a small number of areas were found to be in the controlled area and most were in the prohibited area. This research emphasizes the importance of predicting and modeling the spread of radioactive contaminants and shows that instantaneous atmospheric conditions have a great impact on the accuracy of predictions, and that the spread and deposition of particles and the dose distribution are strongly dependent on the climatic conditions of the region.	
Correspondin g Author: Zahra Dehghan Bahabadi Email: zdehghanb2007@gmail.com			
Zahra Dehghan Bahabadi,Saead Ghorbani Sehat, Investigating the amount of atmospheric transmission and distribution and deposition of radioactive pollutants in the radioactive waste cloud and the dose received by humans due to the nuclear bomb explosion in the central part of Iran. , Journal of Aerospace Defense2025			



فصلنامه علمی دفاع هوا فضایی

دوره ۳، شماره ۴

زمستان

صص 101-130

شماره مسلسل

مقاله پژوهشی؛ 

بررسی میزان انتشار و نهشت آلاینده های پرتوزا و دوز دریافتی انسان از ابر پسماند تثبیت شده ناشی از

انفجار بمب هسته ای در مرکز ایران

زهرا دهقان بهابادی^۱، سعید قربانی صحت^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، بهداشت پرتوها، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد، یزد، ایران رایانامه:

dehghanb2007@gmail.com

۲. کارشناس ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران رایانامه: saead.gh@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

این تحقیق به بررسی میزان انتشار آلاینده های پرتوزا و دوز دریافتی ناشی از انفجار بمب هسته ای فرضی در مرکز ایران با HYSPLIT و داده های GDAS بدون بررسی واکنش های شیمیایی می پردازد. نتایج نشان داد جهت انتشار و رسوب هسته های پرتوزا به طور عمده شمال شرقی و مقدار کمی جنوب شرقی محل انفجار است و گسترش مواد پرتوزا ۱۲ ساعت پس انفجار حدود ۳۰۰ کیلومتر از محل انفجار می رسد و استان یزد و نواحی جنوبی خراسان جنوبی و شمال استان کرمان درگیر می شوند. در ابتدا توده بشدت رشد کرده و تا ارتفاع ۵۰۰۰ متر می رسد. با گذشت زمان، ارتفاع ذرات کاهش یافته و بیشتر رسوب می کنند و مقدار بیشینه غلظت رسوب ذرات بیشتر از مقدار غلظت انتشار آنها است و بیشینه غلظت و رسوب ذرات در مناطق شمال شرقی محل انفجار حدود ۲۰۰ کیلومتر از آن است جایی که دوز دریافتی انسان ها به بیش از ۱۰۰ میلی سیورت می رسد. همچنین، میزان دوز کل دریافتی افراد روی سطح زمین در ارتفاع ۰ متر بیشتر از دوز کل دریافتی در ارتفاع ۰ تا ۱۰۰ متر است. با گذشت زمان، غلظت ابر اتمی کاهش یافته و در نتیجه دوز دریافتی افراد نیز کاهش می یابد. میزان دوز دریافتی افراد اکثراً بسیار بیشتر از حد مجاز تعیین شده توسط کمیسیون بین المللی حفاظت در برابر اشعه (ICRP) می باشد. از نظر پرتو زایی، تعداد کمی از مناطق جزو ناحیه کنترل شده و اکثراً جزو ناحیه ممنوعه به دست آمدند این تحقیق بر اهمیت پیش بینی و مدل سازی نحوه انتشار آلاینده های پرتوزا تأکید دارد و نشان می دهد که شرایط جوی لحظه ای تأثیر زیادی بر دقت پیش بینی ها دارد و انتشار و رسوب ذرات و توزیع دوز به شدت به شرایط آب و هوایی منطقه وابسته است.

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۶/۱۶تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۱/۲۵

کلیدواژه ها:

HYSPLIT ،
آلاینده های
هسته ای ،
پخش جوی ،
بمب اتمی

نویسنده مسئول:
زهرا دهقان بهابادی

ایمیل:
zdehghanb2007@gmail.com

استناد: زهرا دهقان بهابادی، سعید قربانی صحت، بررسی میزان انتشار و نهشت آلاینده های پرتوزا و دوز دریافتی انسان از ابر پسماند تثبیت شده ناشی از انفجار بمب هسته ای در مرکز ایران مجله علمی پژوهشی دفاع هوا فضایی. ۱۴۰۳

۱- مقدمه

انفجار بمب هسته‌ای یکی از فاجعه‌بارترین رویدادهایی است که می‌تواند اثرات مخرب گسترده‌ای بر محیط زیست و سلامت انسان داشته باشد. یکی از مهم‌ترین پیامدهای چنین انفجاری، انتشار مواد پرتوزا در اتمسفر و پخش آن در مناطق وسیع است. این مواد پرتوزا می‌توانند از طریق باد و بارش به مناطق دوردست منتقل شده و آلودگی رادیواکتیو گسترده‌ای ایجاد کنند [(۱)] این موضوع در حال حاضر فراتر از مرزها رفته و به یک بحران جهانی تبدیل شده است که کشورها و ملت‌ها را درگیر می‌کند. [(۲)] وقوع جنگ‌های اتمی و حوادث رآکتورهای اتمی در کشورهای ژاپن، آمریکا، فرانسه، برزیل، انگلیس، روسیه، اوکراین و ... منجر به پخش و انتشار مواد پرتوزای خطرناک در محیط زیست شده است [(۳)] پیش‌بینی و مدل‌سازی نحوه انتشار و پخش این آلاینده‌های پرتوزا در جو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سال ۱۹۷۰ با ورود اطلاعات ماهواره‌ای به جوامع ملی و دانشگاهی، پژوهش‌های متعددی در زمینه استفاده از دانش سنجش از دور و ردیابی مسیر انتشار این مواد انجام شده است [(۴)] پخش آلاینده‌ها در هوا به انتقال آن‌ها توسط باد و همچنین پخش همزمان ناشی از آشفته‌گی‌های جوی و فرآیندهای تعدیل مانند فرسایش وابسته است. مدل‌های پخش اتمسفری به طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: مدل گوسی، مدل‌های مسیر حرکت یا PUFF^۱ [(۳)] دو بعدی و مدل‌های سه بعدی [(۵)]. نرم‌افزارهای متعددی برای شبیه‌سازی انتشار مواد پرتوزای ناشی از حوادث سلاح‌ها و نیروگاه‌های هسته‌ای وجود دارند. مدل HYSPLIT که برای اولین بار توسط اداره هواشناسی استرالیا هوایی NOAA^۲ سال ۱۹۸۲ ایجاد و با همکاری اداره هواشناسی استرالیا توسعه یافت، کاربردهای متنوعی شامل ردیابی و پیش‌بینی مسیر آلاینده‌ها، مسیریابی ذرات هوا، خاکسترهای آتشفشانی، دود ناشی از آتش‌سوزی‌های مخرب و پخش جوی مواد حاصل از حوادث هسته‌ای و شیمیایی و همچنین شبیه‌سازی پراکندگی و ته‌نشینی آن‌ها دارد. [(۳، ۶، ۷)]. و به عنوان یک مدل دوربرد، برای مدل‌سازی حوادث و فوریت‌های هسته‌ای مناسب است [(۲)] روش محاسبه HYSPLIT ترکیبی از روش‌های لاگرانژی و اویلری است که این دو روش به طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی انتشار آلاینده‌های هوا مورد استفاده قرار گرفته‌اند [(۴)]. در این مدل، پخش ذرات به صورت سه‌بعدی و گوسی انجام می‌شود. در پخش سه‌بعدی، آلاینده از منبع آغاز شده و در سه

^۱ واحدی برای شبیه سازی و ردیابی آلودگی ها در جو : PUFF

^۲ NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

جهت پخش می‌شود. در پخش گوسی، منبع به عنوان یک دودکش نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود و آلاینده به صورت گوسی منتشر شده و غلظت پراکندگی هوای آلوده در پایین‌دست محاسبه می‌گردد [Moroz (۵, ۸)]. و همکاران با بررسی انتشار و رسوب مواد پرتوزای ناشی از آزمایش بمب هسته‌ای در جزایر مارشال، به این نتیجه رسیدند که کمیت و کیفیت داده‌های هواشناسی، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر دقت پیش‌بینی مدل‌های شبیه‌سازی هستند و فاصله بین نقاط داده‌ای ورودی در شبکه، بر دقت محاسبات مدل اثرگذار است. نتایج این مدل با مدل‌های دیگر مقایسه شد که در بعضی موارد مشابه و در بعضی موارد متفاوت بودند که تفاوتها احتمالاً به دلیل اختلاف داده‌های هواشناسی (باد) ذکر شده است. [Beck (۸)] و همکاران رسوب مواد پرتوزا ناشی از آزمایش‌های هسته‌ای در جزایر مارشال را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که میزان جذب مواد پرتوزا توسط انسان‌ها با داده‌های جمع‌آوری شده از مناطق آلوده و همچنین داده‌های موسسه ملی سرطان همخوانی دارد [Wendel (9)]. و همکاران به بررسی انتقال دوربرد ذرات حاوی اورانیوم و پلوتونیوم از محل آزمایش‌های هسته‌ای در قزاقستان به نروژ پرداختند. این پژوهش، انتقال دوربرد این ذرات تانروژ را تأیید کرد و نتایج نشان داد که غلظت این ذرات در نمونه‌های جمع‌آوری شده در فصل‌های پاییز و زمستان نسبت به بهار و تابستان کمتر است. که این امر احتمالاً به دلیل تغییرات در شرایط جوی و فعالیت‌های ترپوسفیری در ماه‌های مختلف سال است. [Rolph (۱۰)] و همکاران به مدل‌سازی ریزش ابرهای هسته‌ای تثبیت‌شده ناشی از ۶ آزمایش هسته‌ای انجام شده در سایت نوادا بین سال‌های ۱۹۵۱ تا ۱۹۵۷ با حذف ته نشست مرطوب ذرات (چون آزمایش‌های نوادا طوری طراحی شدند که وقتی باران نمی‌بارد انجام شوند و رسوب مرطوب در شرایط بارندگی نقش مهمی می‌تواند داشته باشد و اغلب می‌تواند منجر به افزایش موضعی رادیواکتیویته شود) پرداختند. نتایج حاصل از این مدل‌سازی، به‌ویژه هنگامی که از مدل هواشناسی WRF^۱ استفاده شد، با داده‌های هواشناسی موجود تطابق بسیار خوبی داشت و دقت بالایی را نشان داد. [su] و همکاران به توسعه مدلی برای ردیابی مسیر انتشار مواد پرتوزا پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری اساسی برای شناسایی و بررسی فعالیت‌های هسته‌ای مخفی در کشورهای همسایه کره شمالی مورد استفاده قرار گیرد. [Philippe (۱۲)] و همکاران با بررسی پیامدهای آزمایش‌های هسته‌ای اتمسفری در مناطق نیومکزیکو و نوادای ایالات متحده، دریافتند که مواد رادیواکتیو حاصل از این انفجارها در بسیاری از موارد از مرزهای کانادا و مکزیک عبور کرده و در برخی

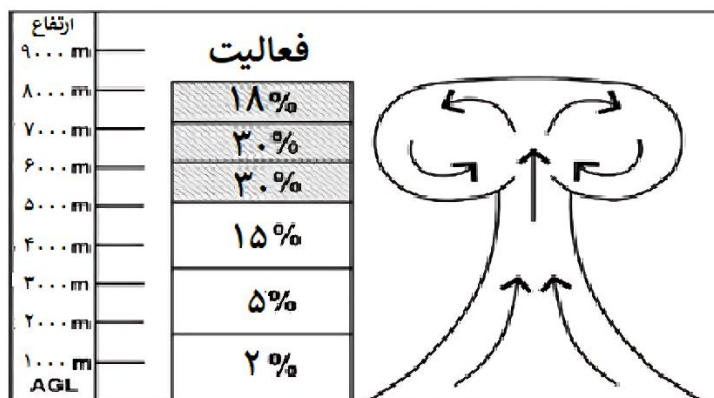
¹ WRF : Weather Research and Forecasting Model

مناطق، به ویژه در رسوبات یک دریاچه، تراکم بالایی از پلوتونیوم مشاهده شده است. [(۱۳)] نوناکارو همکاران با استفاده از شبیه سازی، به بررسی پخش مواد رادیواکتیو ناشی از انفجار انواع مختلف بمب های هسته ای پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش قدرت انفجار بمب هسته ای، منجر به گسترش بیشتر منطقه آلوده به مواد رادیواکتیو می شود. [(۳)] Lisowski و همکاران به بررسی پتانسیل استفاده از سلاح های هسته ای کم بازده و تأثیر ارتفاع انفجار بر روی ریزش های هسته ای پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که ارتفاعی که در آن انفجار هسته ای رخ می دهد، نقش بسیار مهمی در میزان و گستره آلودگی رادیواکتیو ناشی از ریزش های هسته ای دارد. [(۱۴)] Yao و همکاران به بررسی انتقال هسته های پرتوزا در مناطق قطبی پرداختند. نتایج تحقیقات آن ها نشان می دهد که مواد پرتوزا قبل از رسوب در یخچال های طبیعی ژاپن، اقیانوس آرام، اروپا و آسیای مرکزی، مسافت های طولانی را طی کرده و حتی به لایه استراتسفر جو زمین نیز رسیده اند. [(۱۵)] هدف از این مطالعه، واکاوی نحوه انتقال و پخش جوی و رسوب آلاینده های پرتوزا ناشی از یک انفجار هسته ای فرضی در مرکز ایران و ارزیابی میزان دوز دریافتی بر جمعیت های انسانی است. این بررسی می تواند به درک بهتر خطرات بالقوه چنین رویدادی و ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش آسیب های احتمالی کمک کند.

۲. روش شناسی

در این پژوهش، سناریویی شبیه سازی شده که در آن انفجار یک بمب پلوتونیومی ۲/۵ کیلو تنی در مرکز ایران (با مختصات جغرافیایی ۳۱/۰۰ درجه شمالی و ۵۴/۰۰ درجه شرقی) منجر به رهاسازی ۱۰۰۰ کیلوگرم مواد پرتوزا در محیط زیست شده است. در این بخش ۲ هدف عمده دنبال میشود. در اولین قدم میزان غلظت انتشار و ته نشست مواد پرتوزا در ارتفاع ۰ تا ۱۰ متری از سطح زمین و بر روی زمین، سپس میزان دوز دریافتی توسط افراد در ارتفاع ۰ تا ۱۰ متری از سطح زمین و روی سطح زمین محاسبه میشود. همچنین از تأثیر آلاینده ها بر محیط صرف نظر شده و تنها الگوی پاشندگی بررسی شده است. در هنگام وقوع چنین حوادثی، برای پیش بینی دقیق نحوه پراکندگی آلودگی رادیواکتیو، بحث فصول و میانگین شرایط هواشناختی ماههای هرفصل مطرح نیست بلکه روز و ساعت دقیق وقوع حادثه مهم هستند. به عبارت دیگر شرایط جوی لحظه ای و محلی، تأثیر تعیین کننده ای بر نحوه انتشار و گسترش آلودگی رادیواکتیو دارند. [(۴)]. برای محاسبه میزان غلظت و ته نشست مواد پرتوزا و دوز دریافتی افراد مدل HYSPLIT نسخه ۴ به کار گرفته شده است. روش محاسبه HYSPLIT ترکیبی از روش لاگرانژی و اویلری است. [(۴، ۱۶، ۱۷)] کلمه Hybrid در HYSPLIT به توانایی خاص این مدل برای بیان آلودگی به صورت گوسی یا بالا-کلاه اشاره میکنند در صورتیکه برای محاسبات پراکندگی عمودی آلودگی به صورت ذره

رفتار میکند. [(۱۸)] پارامترهای گوناگونی برای شبیه سازی در مدل **HYSPLIT** اعم از داده های هواشناسی، ته نشست خشک، ته نشست مرطوب، بازتعطیل ذرات ته نشست شده، چگالی، شکل، قطر و نیمه عمر ذرات، مورد نیاز است. در این پژوهش از داده های هواشناسی **GDAS**^۱ با مختصات مکانی یک درجه و شرایط فشاری ایزوبار استفاده شده است. شبکه مدل سازی با تفکیک مکانی ۳۰ درجه و مرکز آن استان یزد با طول و عرض جغرافیایی ۳۱/۹۰۵۵۴۱۵ و ۵۴/۳۲۷۳۹۲۶ در نظر گرفته شده است. پس از گذشت چندین روز تعداد بسیار زیادی از هسته های پرتوزا بدلیل نیمه عمر پایین خود از بین خواهند رفت و تنها عناصری با نیمه عمر بالا در فواصل بسیار دور از چشمه تاثیر گذار خواهند بود بنابراین این مدل برای شبیه سازی ۱۲ ساعت ابتدایی روز اول ماه می سال ۲۰۲۳ اجرا شده است برای تخمین حدودی میزان انتشار ایزوتوپ های رادیواکتیو از یک بمب اتمی میتوان از تخمین های کلی و داده های موجود استفاده کرد. گرچه این مقادیر میتواند بسته به شرایط مختلف متفاوت باشد ولی بطور کلی تخمین زده میشود از یک بمب هسته ای با قدرت ۲/۵ کیلو تن چند درصد معین از جرم کل بمب به هر کدام از ایزوتوپهای رادیواکتیو تبدیل میشود که با استفاده از فرمولهای ریاضی موجود میزان انتشار هر کدام از آلاینده ها بر حسب بکرل بر ساعت تعیین میشوند. نتایج شبیه سازی غلظت انتشار و رسوب مواد پرتوزا و دوز دریافتی افراد در ارتفاع های صفر و ۱۰۰ متری از سطح زمین را برآورد می کند. برای مدل سازی سریع ریزش اتمی، بجای محاسبه تکامل پیچیده ابر، تعیین دقیق ویژگی های ابر هسته ای پس از تثبیت آن ضروری است. [(۳)] [در شکل ۱ شمایی از ابر حاصل از انفجار بمب اتمی ۱۰ کیلو تنی آورده شده است. ناحیه سایه دار لایه هایی را نشان میدهد که کلاهک ابر را مشخص میکند.



¹ GDAS : Global Data Assimilation System

شکل (۱) شماتیک ابر اتمی حاصل انفجار بمب ۱۰ کیلو تنی [11]

ابر هسته ای زمانی تثبیت میشود که دمای آن بادمای هوای مجاورش به تعادل برسد. در این هنگام رشد عمودی ابر متوقف میشود. ذرات هسته ای بطور مستقیم توسط واکنش شکافت خارج شده و بر اساس اندازه، شکل و چگالی ذره در جو سقوط میکنند. در این مطالعه، برای ساده کردن ابر هسته ای تثبیت شده به شکل یک استوانه فرض و به ۶ لایه (دیسک) تقسیم شده است. این تکنیک پیش بینی بر اساس دستورالعمل^۱ NATO(2012) تعریف شده است. ضخامت و ارتفاع هر لایه به بازده هسته ای بمب بستگی دارد.

جدول (۱) مشخصات ابر حاصل از انفجار بمب های اتمی با اندازه های مختلف [۱۱]

بازده (کیلو و تن)	<= 2.5	<= 7.5	<= 1 2.5	<= 1 7.5	<= 2 2.5	<= 2 7.5	<= 3 2.5	<= 3 7.5	<= 4 2.5	<= 4 50
سطح ۷ (متر)	370 0	630 0	820 0	970 0	108 00	112 00	116 00	119 00	122 00	125 00
سطح ۶ (متر)	313 2	543 4	716 6	853 2	953 2	990 0	102 32	105 00	107 66	110 00
سطح ۵ (متر)	256 6	456 7	613 0	736 6	826 6	860 0	886 6	910 0	933 3	950 0
سطح ۴ (متر)	200 0	370 0	510 0	620 0	700 0	730 0	750 0	770 0	790 0	800 0

¹ NATO: NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION

سطح ۳ (متر)	133 4	246 6	340 0	413 2	466 6	486 6	500 0	513 2	526 6	533 2
سطح ۲ (متر)	667	123 3	170 0	206 6	233 3	243 3	250 0	256 6	263 3	266 6
سطح ۱ (متر)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

همچنین فرض شده است که تمام ذرات از یک خط عمودی از طریق مرکز بجای کل قطر ابر آزاد میشوند این فرض طبق مقاله **Rolph** و همکاران ثابت کرده نباید بطور قابل توجهی بر نتایج تاثیر بگذارد. [۱۱] برای توصیف هر لایه، ۱۴ نوع ذره با اندازه‌های مختلف در نظر گرفته شده است. این ذرات شامل یک نوع ذره نماینده گازهای نجیب و ۱۳ نوع ذره پرتوزا با نیمه عمرهای متفاوت هستند. با فرض اینکه بخش عمده ای از مواد رادیواکتیو به ذرات خاک چسبیده اند، فرض شده است که ذرات شکل کروی داشته و چگالی آنها به طور متوسط ۲/۵ گرم بر سانتی متر مکعب است [۳]. اندازه ذرات بین ۲۰ تا ۵۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. سرعت ته نشست ذرات بر اساس نوع پوشش زمین و فرایندهای درون وزیر ابری محاسبه شده است. محاسبات مربوط به ته نشست خشک در همه مدل‌سازیه‌های حساس و نامطمئن است. زیرا این پارامتر به تاثیر متقابل بین پارامترهای مدل شده و پوشش زمین حساس است که با زمان و مکان تغییر میکند. رویکرده ته نشست خشک ثابت با وجود همه عدم قطعیت هایش در این تحقیق به کارفته است. اگرچه این رویکرد بسیار نامطمئن است اما بطور گسترده در مدل‌های سینوپتیک به کار میرود. برای مناطق شهری، سرعت متوسط ته نشست خشک ۰/۰۰۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. [۱۸] حذف ذرات خشک بر اساس سرعت ته نشینی گرانشی ذرات محاسبه میشود. برای ته نشست مرطوب فرایندهای درون وزیر ابری مانند برخورد و چسبندگی ذرات به قطرات آب، با ضرایب $4E+4$ و $5E-5$ مدل سازی شده‌اند. فرایند باز تعلیق ذرات با ضریب $1E-6$ و برای گازهای نجیب ۰ در نظر گرفته شده است و به این معنی است که از هر یک میلیون ذره ای که در زمین مینشینند تنها یک ذره دوباره از سطح زمین جدا شده و وارد هوا میگردد. [۳] بیشتر داده ها برای نرخ باز تعلیق بعد از مطالعه بر روی حادثه چرنوبیل به دست آمده است. [۱۸] نیمه عمر ذرات در جدول ۲ تعیین گردید.

جدول ۲: نیمه عمر مواد پرتوزا در ابر حاصل از انفجار اتمی [۳]

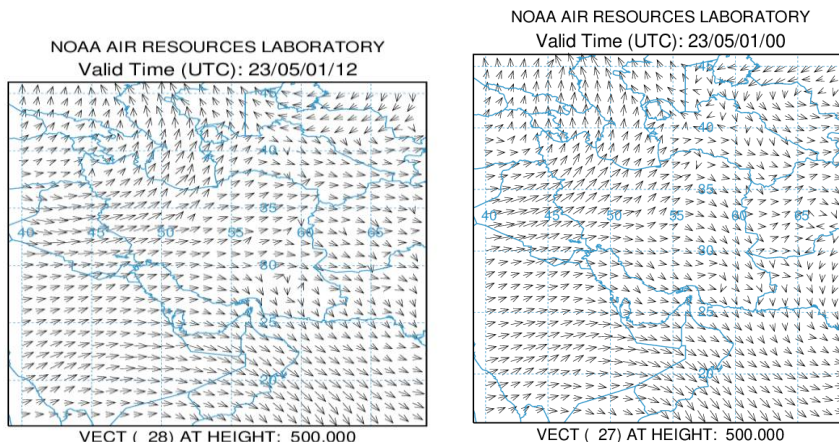
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----

ذره پرتوزا	نیمه عمر	قطر ذرات)
I131	۸/۰۲	۵۰۰
Ba140	12.8days	۳۵۰
Cs136	13.2days	۲۷۵
Ru103	39.3days	۲۲۵
Sr89	50.5days	۱۸۷/۵
Ce144	285days	۱۶۲/۵
Ru106	374days	۱۳۷/۵
Sr90	28.5year	۱۱۲/۵
H3	12.3year	۸۷/۵
Pu241	14.4year	۷۰
Cs137	30.1year	۵۷/۵
C14	5700year	۴۵
Pu240+239	6560years	۲۰

برای مدلسازی دقیق ۳ بعدی پراکندگی ذرات ناشی از بمب هسته ای بدلیل زیادبودن ذرات نیازمند محاسبات فراوانی است . از این رو اعمال یکسری قیود در قسمت تنظیمات پیشرفته نرم افزار ضروری است . [(۳)] در این تحقیق به منظور شبیه سازی انتشار از رویکرد ذره ای ۳ بعدی و PUFF برای رهاسدن در راستای عمودی و افقی استفاده شده و نرخ رهاسدن ذرات و بیشینه ذرات قابل تعریف در هر شبکه طبق راهنمای وب سایت HYSPLIT [(19)] برای بمب هسته ای به ترتیب ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰۰ مشخص شده که نشان دهنده این است هنگامی که تعداد ذرات از بیشینه آن بیشتر شود قطع میگردد همچنین بازه زمانی ۳ ساعته تنظیم شده است . [(۷)]

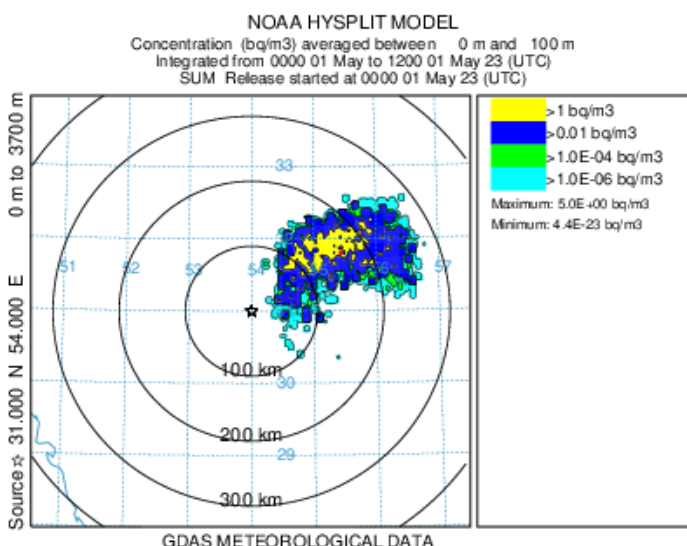
۳. نتایج و بحث

در شکل ۱ و ۲ میدان باد سطحی در ساعت اجرای برنامه مشاهده میشود.

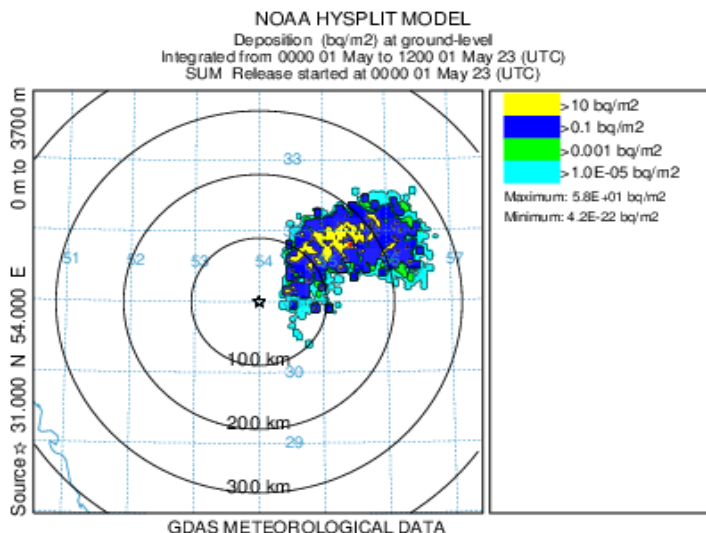


شکل ۱ و ۲: میدان بادبرداری سطحی برای تاریخ شروع ساعت روزاول می و پایان ساعت ۱۲ روزاول می باشد.

در شکل های ۳ تا ۶ انتشار و رسوب هسته های پرتوزا در منطقه ای با طول و عرض جغرافیایی $31/00$ و $54/00$ درجه به تصویر کشیده شده است شکل ۳ و ۴ نشان می دهد که بیشینه غلظت انتشار و رسوب ذرات در مناطق شمال شرقی محل انفجار و در فاصله ای حدود ۲۰۰ کیلومتر از آن قرار دارد. مقایسه بین رسوب و غلظت ایزوتوپ ها نشان می دهد که پخش این مواد در هر دو حالت بیشتر به سمت شمال شرقی و تا حدودی به سمت جنوب شرقی انجام می شود.

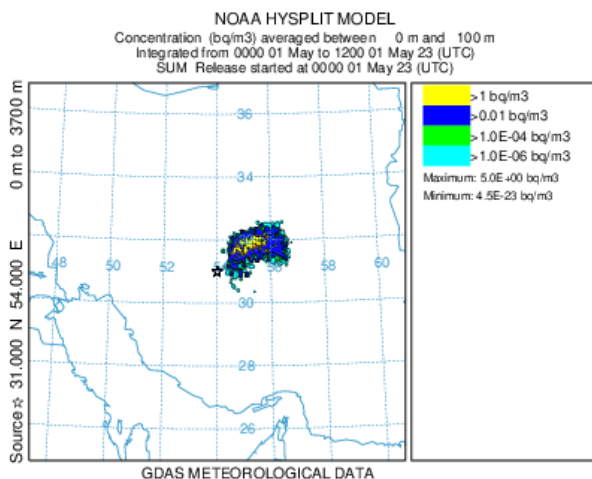


شکل ۳: شبیه سازی انتشار مواد هسته ای ناشی از بمب اتمی در ارتفاع ۱۰ تا ۱۰۰ متری از سطح زمین

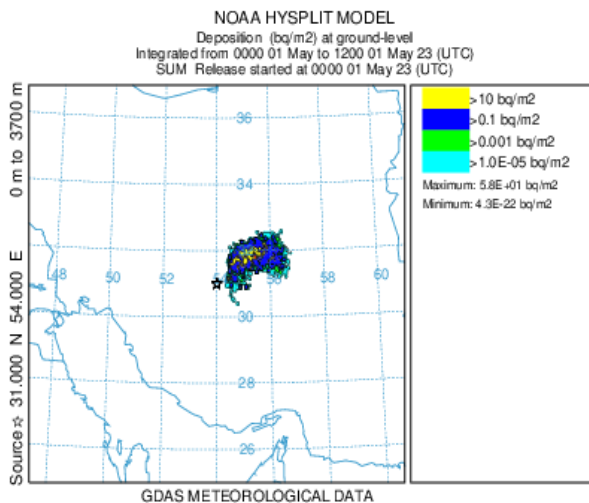


شکل ۴: شبیه سازی نهشت مواد هسته ای ناشی از بمب اتمی بر روی سطح زمین

اشکال ۵ و ۶ نشان می دهند که گسترش مواد پرتوزا ۱۲ ساعت پس از وقوع انفجار به نواحی حدود ۳۰۰ کیلومتر می رسد. به عبارت دیگر در این بازه زمانی، توده پرتوزا از محدوده استان یزد خارج میشود اما همچنان در داخل مرزهای کشور باقی می ماند.



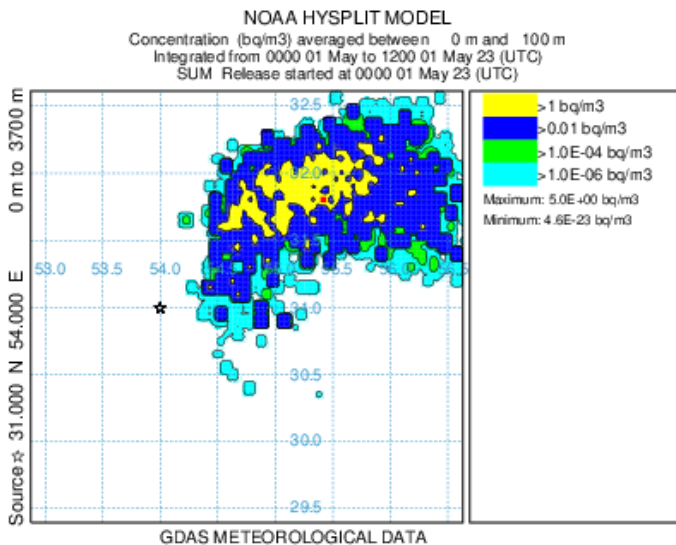
شکل ۵: شبیه سازی انتشار مواد هسته ای ناشی از بمب اتمی در ارتفاع ۱۰ تا ۱۰۰ متری از سطح زمین در ایران



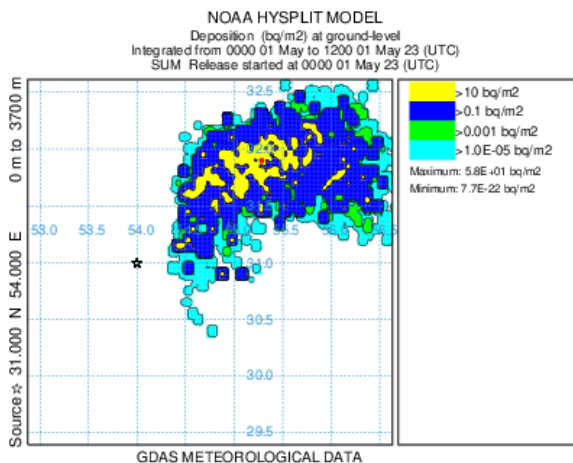
شکل ۶: شبیه سازی نهشت مواد هسته ای ناشی از بمب اتمی بر روی سطح زمین در ایران

در حوادث هسته ای، مواد پرتوزا به دلیل دما و سرعت بالای انتشار، با ارتفاع مؤثر بیشتری در جو پراکنده می‌شوند. این افزایش ارتفاع تأثیر قابل توجهی بر توزیع مواد پرتوزا در اطراف محل انفجار دارد. به‌طور کلی هرچه ارتفاع مؤثر بیشتر باشد غلظت کل مواد پرتوزا در نواحی اطراف محل حادثه کاهش می‌یابد. این نکته به‌ویژه در شرایط آب و هوایی مختلف (از جمله جهت و سرعت باد) اهمیت پیدا می‌کند و می‌تواند نحوه پخش هسته‌های پرتوزا را تحت تأثیر قرار دهد [(18)]. با توجه به تغییرات در جهت باد در فواصل مختلف، غلظت مواد پرتوزا ممکن است در نواحی نزدیک به محل حادثه در ابتدا با افزایش فاصله از محل حادثه اندکی افزایش یابد اما به‌طور کلی با فاصله گرفتن از محل حادثه، مقدار غلظت مواد کاهش می‌یابد. رنگ‌های مختلفی که برای هر ناحیه تعیین شده‌اند، نمایانگر مقدار غلظت در آن ناحیه هستند. حداکثر غلظت انتشار در مواردی بیش از ۱ بکرل بر مترمکعب با رنگ زرد نمایش داده شده است در حالی که کمترین مقدار غلظت انتشار به $1E-6$ بکرل بر مترمکعب به رنگ آبی مربوط می‌شود. حداکثر غلظت رسوب بیش از ۱۰ بکرل بر مترمکعب با رنگ زرد نشان داده شده و کمترین مقدار غلظت رسوب کمتر از $1E-5$ بکرل بر مترمربع به رنگ آبی است. این

مقادیر نشان دهنده تأثیرات جدی مواد پرتوزا بر محیط زیست و سلامت ساکنین در فاصله‌ای بین ۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر از محل حادثه می‌باشد. (شکل ۷ و ۸)



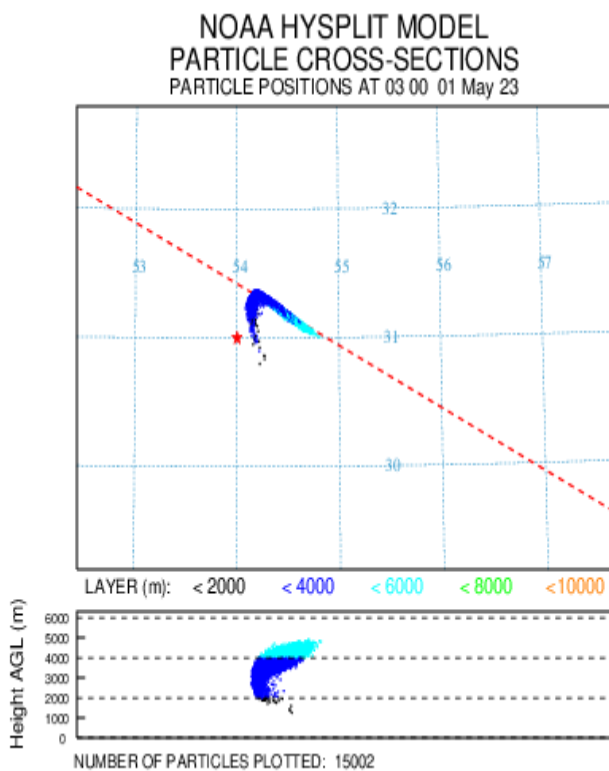
شکل ۷: غلظت (Bq/m³) ناشی از کل هسته های پرتوزای انتشار یافته از بمب اتمی در ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین



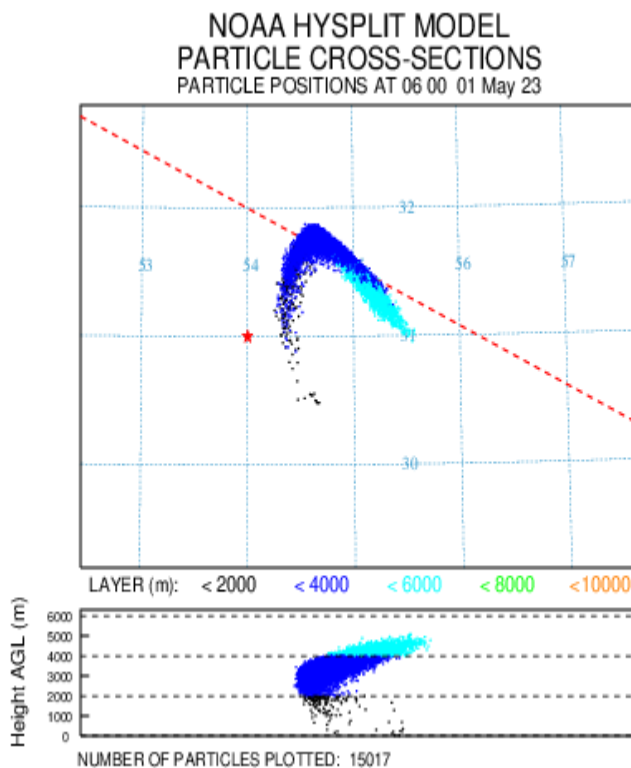
شکل ۸: غلظت (Bq/m²) ناشی از کل هسته های پرتوزای رسوب یافته از بمب اتمی بر روی سطح زمین

شکل های ۹ و ۱۰ مقطع عمود بر توده گرد و غبار را در وضعیت افقی و انتشار ذرات در بازه های ۳ ساعته پس از وقوع انفجار نشان می‌دهند. رنگ

ذرات نمایانگر ارتفاع آن‌ها است و طبق مقیاس رنگی، ارتفاع توده بین ۰ تا ۵۰۰۰ متر متغیر است. این شکل‌ها به وضوح چگونگی پخش و گسترش مکانی ذرات را به تصویر می‌کشند. توده گرد و غبار با حرکت در راستای شمال شرقی و جنوب شرقی، نواحی اطراف را تحت تأثیر قرار داده است و بیشینه ارتفاع توده به ۵۰۰۰ متر با رنگ آبی نمایش داده شده است. در ساعت ۳ توده گرد و غبار تقریباً ۱۰۰ کیلومتر در جهت طول و ۵۰ کیلومتر در جهت عرض به سمت شمال شرقی پیشرفت کرده و تا ارتفاع ۵۰۰۰ متر با رنگ آبی کمرنگ و ذرات پراکنده‌ای به ارتفاع ۲۰۰۰ متر با رنگ سیاه، تقریباً ۱۰ کیلومتر در طول و عرض در جهت جنوب شرقی از محل انفجار مشاهده می‌شود. پس از گذشت ۳ ساعت و در ساعت ۶ توده گرد و غبار به حدود ۱۵۰ کیلومتر در طول و ۱۰۰ کیلومتر در عرض به سمت شمال شرقی گسترش یافته و همچنان تا ارتفاع ۵۰۰۰ متر با رنگ آبی کمرنگ ادامه دارد. همچنین ذرات پراکنده‌ای به ارتفاع ۲۰۰۰ متر با رنگ سیاه در حدود ۴۰ کیلومتر در جهت طول و ۶۰ کیلومتر در جهت عرض جغرافیایی به سمت جنوب شرقی گسترش یافته‌اند.

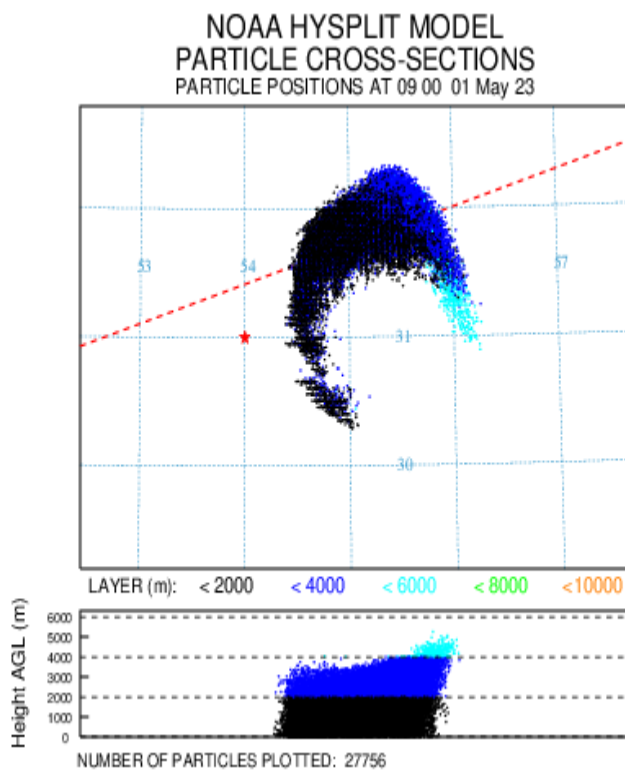


شکل ۹ : سطح مقطع عمود بر توده گردوغبار اتمی در ساعت ۳ روز اول می باشد.

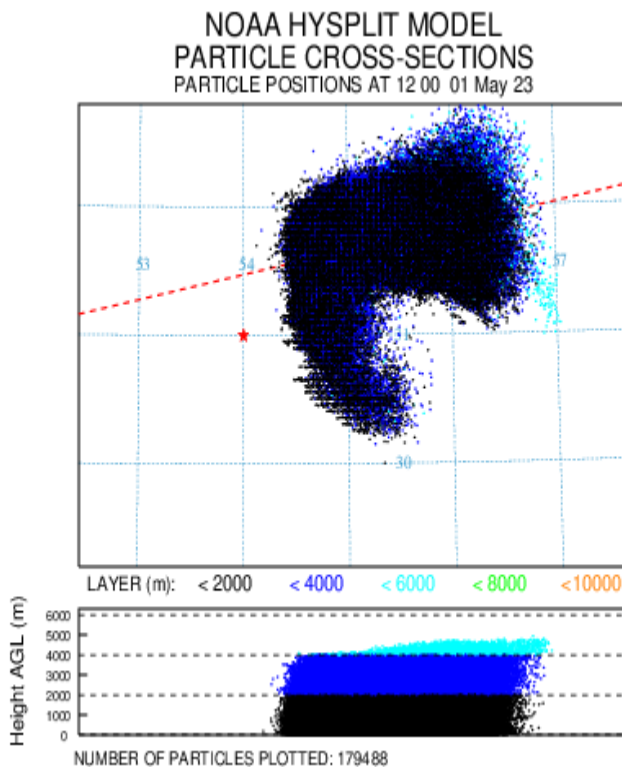


شکل ۱۰ : سطح مقطع عمود بر توده گردوغباری در ساعت ۶ روز اول می باشد.

با توجه به شکل ۱۱ و ۱۲ مشاهده می شود توده گرد و غبار در ساعت ۹ صبح حدود ۲۰۰ کیلومتر در جهت طول و ۱۲۰ کیلومتر در جهت عرض به سمت شمال شرقی گسترش یافته است. این توده به طور کلی تا حدود ۲۰۰ کیلومتر در مسافت افقی توسعه یافته و ۶۰ کیلومتر در طول و ۶۰ کیلومتر در عرض جغرافیایی می باشد. در ساعت ۱۲ توده گرد و غبار به حدود ۳۰۰ کیلومتر در عرض و ۲۰۰ کیلومتر در طول در جهت شمال شرقی گسترش یافته و در جهت جنوب شرقی نیز به طول ۱۵۰ کیلومتر و عرض ۸۰ کیلومتر توسعه یافته است. با توجه به مقیاس رنگی به کار رفته با گذشت زمان مشاهده می شود که ارتفاع ذرات به طور تدریجی کاهش یافته و بیشتر ذرات در ارتفاع ۰ تا ۲۰۰۰ متر با رنگ سیاه رسوب کرده اند. این تغییرات در ارتفاع نشان دهنده فرآیندهای رسوب گذاری و کاهش تحرک ذرات در جو در اثر جاذبه زمین و عوامل دیگر است. این نتایج همچنین بر اهمیت توجه به الگوهای رسوب و توزیع مواد معلق در جو تأکید می کند.

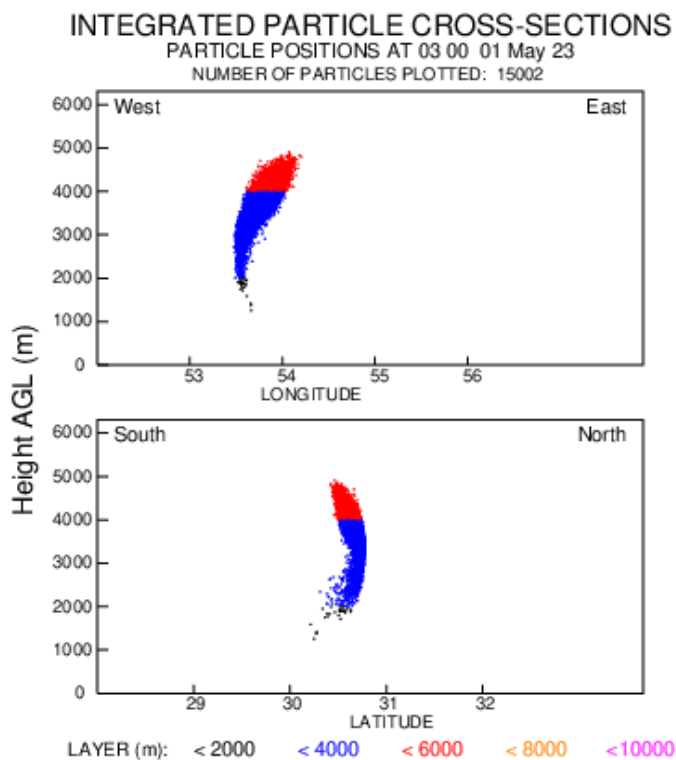


شکل ۱۱ : سطح مقطع عمود بر توده گرد و غبار اتمی در ساعت ۹ روز اول می باشد.

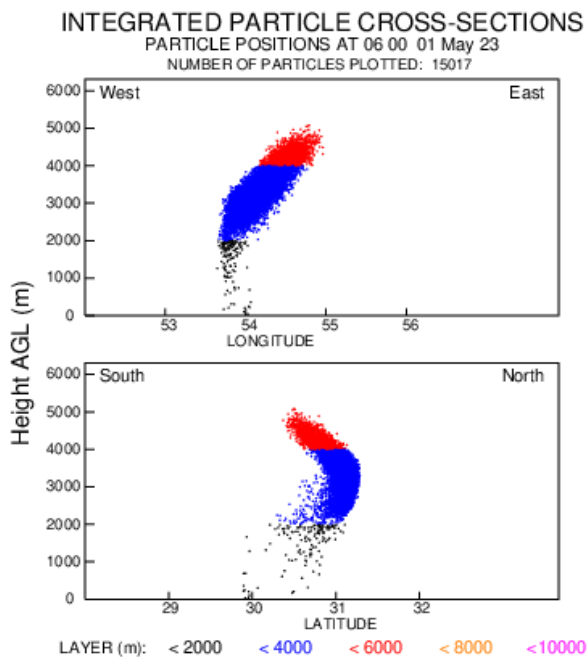


شکل ۱۲ : سطح مقطع عمود بر توده گرد و غبار اتمی در ساعت ۱۲ روز اول می باشد.

با توجه به اینکه فرآیند انتشار و حل مواد در این مدل به صورت ذره‌ای و سه‌بعدی صورت می‌گیرد، امکان نمایش خروجی مدل در راستای قائم وجود دارد. [(۷)] این نمایش می‌تواند به گونه‌ای باشد که در دو راستای عرض جغرافیایی (برش شمال به جنوب) و طول جغرافیایی (برش شرق به غرب) ارتفاع توده ذرات به دست آید. شکل‌های ۱۳ تا ۱۴ به ترتیب وضعیت قرارگیری ارتفاعی انتشار ذرات را در روز اول و در بازه‌های ۳ ساعته پس از وقوع انفجار نشان می‌دهند. در آغاز حرکت، توده گرد و غبار به سرعت رشد کرده و به ارتفاع حدود ۵۰۰۰ متر با رنگ قرمز می‌رسد. در ساعت‌های ۳ و ۶ بعد از انفجار، توده گرد و غبار به سمت جنوب شرقی حرکت کرده و به تدریج ارتفاع ذرات کاهش یافته است. این کاهش ارتفاع می‌تواند به دلیل عوامل مختلفی مانند جاذبه زمین، فرایندهای رسوب‌گذاری و همچنین تغییرات در شرایط جوی مانند تغییر در سرعت و جهت باد باشد.

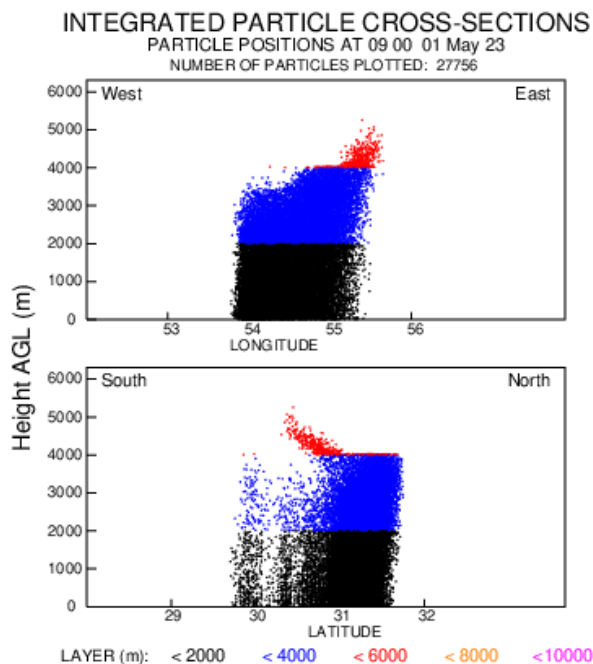


شکل ۱۳: وضعیت قرارگیری ارتفاعی توده گرد و غبار اتمی در ساعت ۳ روز اول ماه می در د و محور طولی و عرضی جغرافیایی

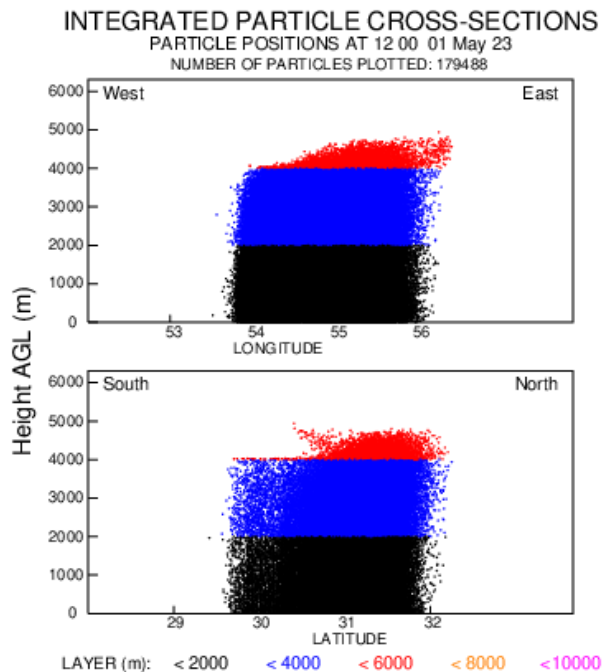


شکل ۱۴: وضعیت قرارگیری ارتفاعی توده گردوغباراتی در ساعت ۶ روز اول ماه می در دو محور طولی و عرضی جغرافیایی

با گذشت زمان و در ساعات ۹ و ۱۲ توده گرد و غبار به سمت شمال شرقی حرکت کرده و ارتفاع ذرات به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. بیشتر ذرات در ارتفاع ۰ تا ۲۰۰۰ متر با رنگ سیاه قرار گرفته و رسوب کرده‌اند. با این حال کل ارتفاع توده همچنان در بازه ۰ تا ۵۰۰۰ متر باقی مانده است. شکل (۱۵) وضعیت قرارگیری ارتفاعی توده گرد و غبار را در ساعت ۹ روز اول ماه می در دو محور طولی و عرضی جغرافیایی نمایش می‌دهد. این شکل نمایانگر گسترش اولیه توده و توزیع عمودی آن در جو را نشان می‌دهد. شکل (۱۶) نیز وضعیت قرارگیری ارتفاعی توده گرد و غبار را در ساعت ۱۲ روز اول ماه می در دو محور طولی و عرضی جغرافیایی نشان می‌دهد. در این شکل، تغییرات در ارتفاع و حرکت توده به سمت شمال شرقی به وضوح قابل مشاهده است.

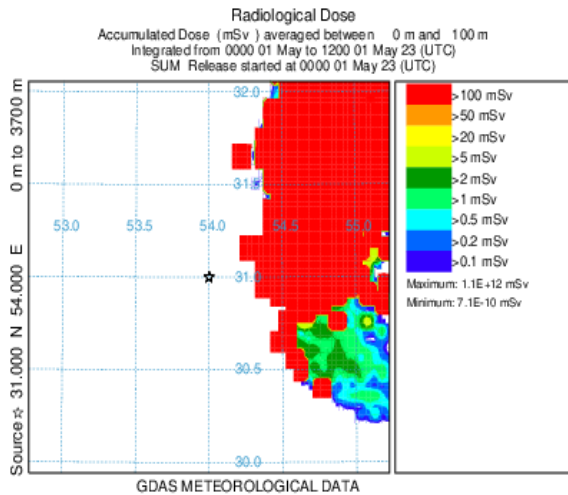


شکل ۱۵: وضعیت قرارگیری ارتفاعی توده گرد و غبار اتمی در ساعت ۹ روز اول ماه می در دو محور طولی و عرضی جغرافیایی

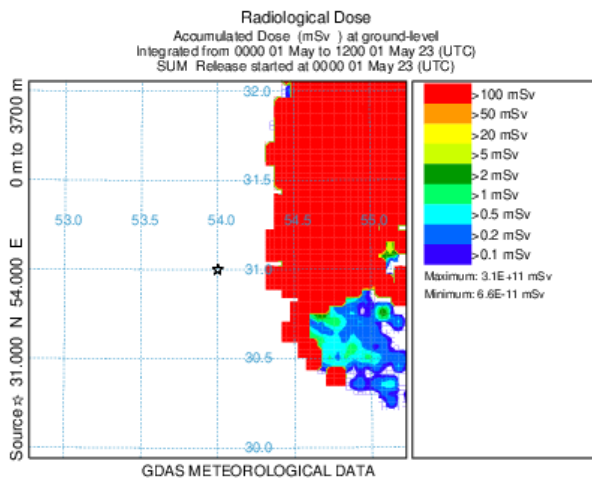


شکل ۱۶: وضعیت قرارگیری ارتفاعی توده گردوغبار اتمی در ساعت ۱۲ روز اول ماه می در دو محور طولی و عرضی جغرافیایی

شکل (۱۷) میزان دوز دریافتی افراد را در ارتفاع ۰ تا ۱۰۰ متر و شکل (۱۸) میزان دوز دریافتی افراد را در سطح زمین ۱۲ ساعت پس از وقوع انفجار نشان می‌دهد. در هر دو مورد بیشترین مقدار دوز دریافتی در مناطق شمال شرقی محل وقوع انفجار مشاهده می‌شود. رنگ هر ناحیه و منطقه نمایانگر میزان دوز کل دریافتی در آن منطقه است. نتایج نشان می‌دهد تنش‌زایی مواد پرتوزا تأثیر بیشتری نسبت به غلظت مواد در دوزگیری افراد دارد. در هر دو ارتفاع، مقدار بیشینه دوز دریافتی بیش از ۱۰۰ میلی‌سیورت با رنگ قرمز در جهت شمال شرقی منطقه است. در مقابل کمترین مقدار دوز دریافتی کمتر از ۰/۱ میلی‌سیورت با رنگ آبی در جهت جنوب شرقی منطقه است. مقادیر دوز به‌دست‌آمده نشان‌دهنده این واقعیت است که این حادثه برای ساکنین این مناطق یک تهدید جدی به شمار می‌رود و به‌ویژه ساکنین شمال شرقی محل وقوع حادثه بیشترین تأثیر را از این رویداد خواهند پذیرفت.



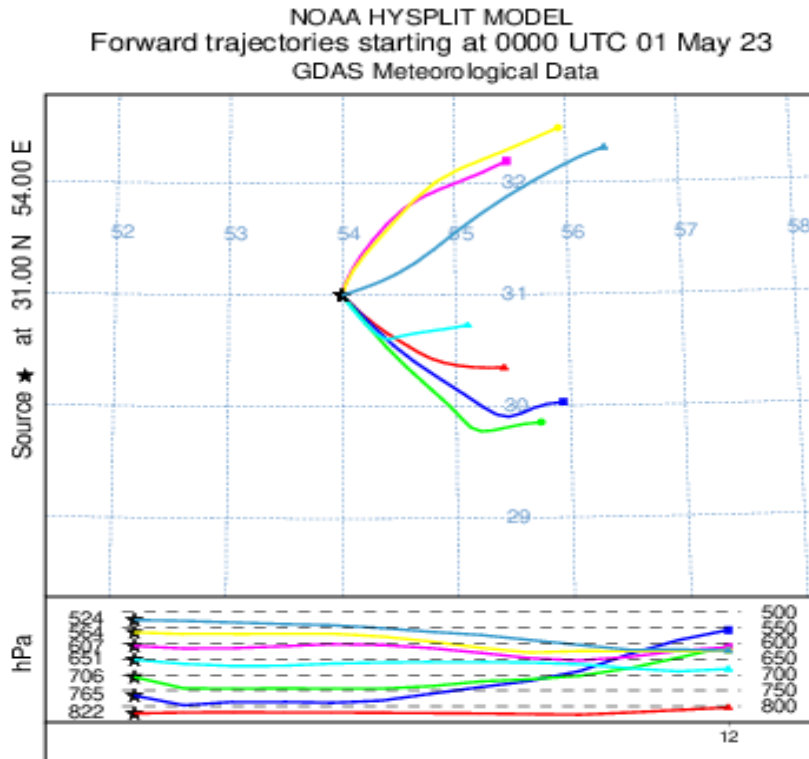
شکل ۱۷ : نحوه توزیع دوز کل در ارتفاع ۱۰ تا ۱۰۰ متری از سطح زمین در سناریوی انفجار بمب اتمی



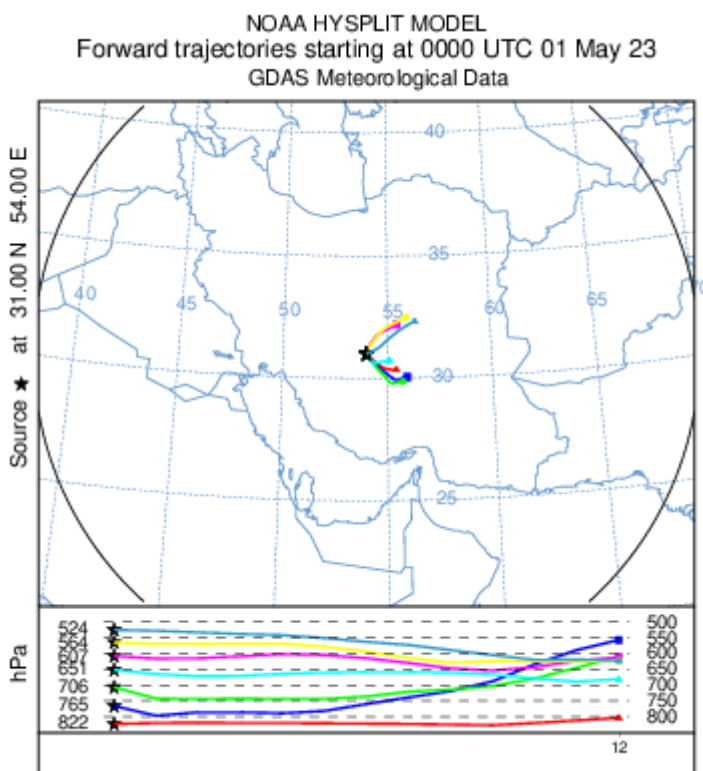
شکل ۱۸ : نحوه توزیع دوز کل در روی سطح زمین در سناریوی انفجار بمب اتمی

شکل های ۱۹ و ۲۰ مسیر کلی انتقال و حرکت توده گرد و غبار را ۱۲ ساعت پس از انتشار نشان می دهند. طبق این اشکال، حرکت توده تحت تأثیر جهت باد و سامانه های فشاری در راستای شمال شرقی و جنوب شرقی صورت گرفته است. در این اشکال، مسیر توده در ۷ سطح فشاری مختلف شامل ۸۲۲، ۷۶۵، ۷۰۶، ۶۵۱، ۶۰۷، ۵۶۴ و ۵۲۲ هکتوپاسکال مشخص شده است. هر یک از این سطوح فشاری با رنگ های مختلف مانند قرمز، آبی، سبز، آبی کم رنگ، صورتی، زرد و بنفش نمایش داده شده اند. این رنگ ها به صورتی

طراحی شده‌اند که به وضوح مسیر حرکت توده را در سطوح مختلف فشار جو نمایان کنند [4].

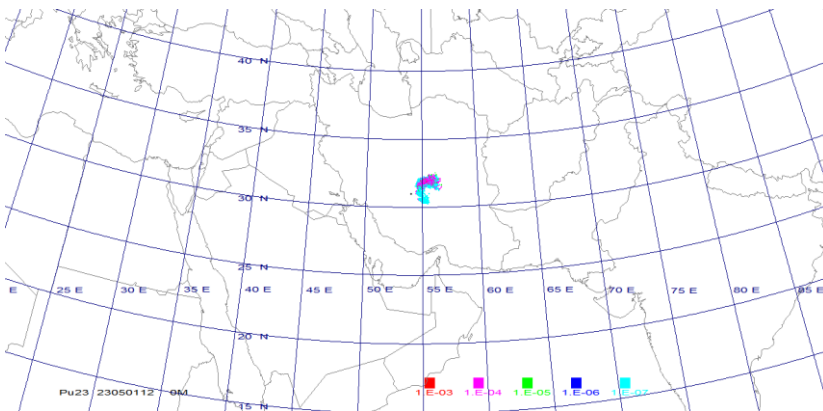
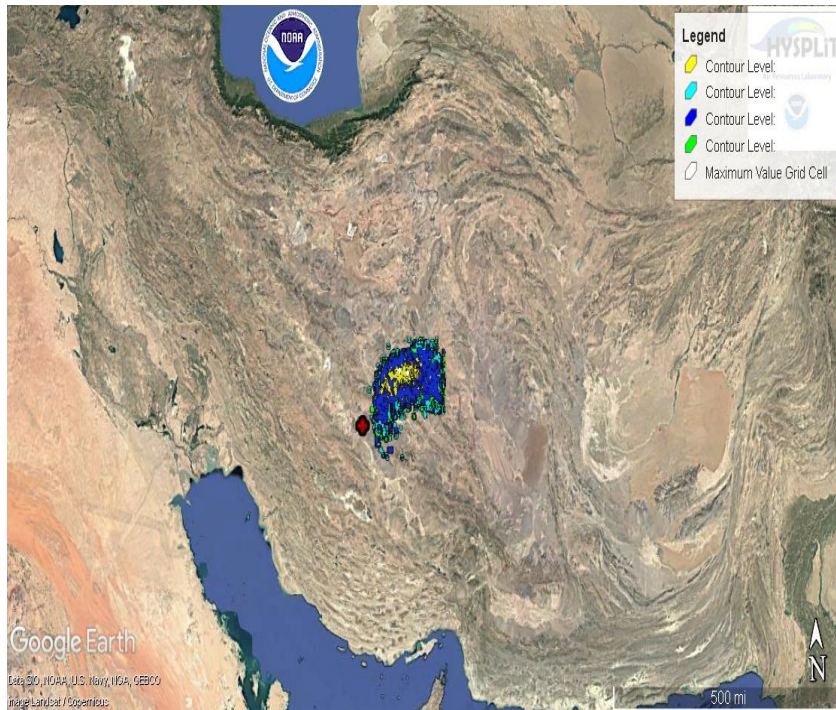


شکل ۱۹: مسیر انتقال و جابجایی مواد هسته ای ناشی از بمب اتمی



شکل ۲۰ : مسیر انتقال و جابجایی مواد هسته ای ناشی از بمب اتمی در ایران

شکل (۲۱) تصویر ماهواره ای پخش مواد پرتوزا را نمایش می دهد و این تصویر امکان پایش انتشار ذرات را بر روی زمین فراهم می کند. استفاده از تصاویر ماهواره ای به عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت بحران و ارزیابی خطرات زیست محیطی، می تواند به بهبود واکنش به حوادث هسته ای و دیگر رویدادهای مشابه کمک کند.



شکل (۲۱) الف) نقشه ماهواره ای منطقه شبیه سازی شده ب) نقشه جهانی منطقه شبیه سازی شده

نتایج شبیه سازی پخش جوی و رسوب ذرات و دوز دریافتی افراد در این سناریو نشان می دهد که جهت حرکت توده گرد و غبار آتمی و انتشار و رسوب ذرات ۱۲ ساعت پس از وقوع حادثه بیشتر به سمت شمال شرقی و اندکی به سمت جنوب شرقی محل حادثه است. با گذشت زمان، ارتفاع ذرات کاهش یافته و بیشتر آنها رسوب می کنند به طوری که مقدار بیشینه غلظت رسوب

ذرات بیشتر از مقدار غلظت انتشار آنها است. همچنین میزان دوز کل دریافتی افراد بر روی سطح زمین بیشتر از دوز کل دریافتی در ارتفاع ۰ تا ۱۰۰ متر است. با گذشت زمان، غلظت ابر اتمی کاهش یافته و در نتیجه دوز دریافتی افراد نیز کاهش می‌یابد و انتشار و رسوب ذرات و توزیع دوز به شدت به شرایط آب و هوایی منطقه وابسته است. میزان دوز دریافتی افراد در اکثر نواحی بسیار بیشتر از حد مجاز تعیین شده توسط کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر اشعه (ICRP) می‌باشد. حد مجاز بر طبق ICRP برای افراد جامعه ۵ میلی‌سیورت در سال است [(18)]. از نظر پرتوزایی، تعداد کمی از مناطق جزو ناحیه کنترل شده و اکثر مناطق جزو ناحیه ممنوعه به دست آمدند.

جدول (3) نتایج نهایی شبیه سازی

زمان (ساعت)		پاشندگی (bq/m ³) ۰-۱۰۰ متر		نهشت (bq/m ²) ۰-۱۰۰ متر		دوز دریافتی (mSv) سطح زمین		دوز دریافتی (mSv) ۰ تا ۱۰۰ متر	
MAX MIN		MAX MIN		MAX MIN		MAX MIN		MAX MIN	
۱۲ ساعت		5.0E+00	1.0E-6	5.8E+1	7.7E-22	3.1E+11	6.6E-11	7.1E-۱/۱	E+12 10

۴. بحث و نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی انتشار و پخش جوی ونهشت آلاینده های پرتوزا و میزان دوز کل دریافتی ناشی از انفجار یک بمب هسته‌ای فرضی در مرکز ایران با استفاده از کد محیطی HYSPLIT پرداخته است. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مواد پرتوزای زیادی به سرعت از محل انفجار خارج شده و تا حدود ۳۰۰ کیلومتر از محل انفجار گسترش داشتند و مسافت‌های قابل توجهی را به سمت شمال شرقی و اندکی به سمت جنوب شرقی طی می‌کنند. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین غلظت انتشار و رسوب مواد پرتوزا در نواحی شمال شرقی محل انفجار و در فاصله‌ای حدود ۲۰۰ کیلومتر از آن قرار دارد. این یافته‌ها نشان‌دهنده الگوی حرکتی مشخصی است که ممکن است در زمان واقعی نیز مشاهده شود. تحلیل دوز دریافتی انسان‌ها در ارتفاع‌های مختلف (۰ تا ۱۰۰ متر) نشان داد که در مناطقی با بالاترین غلظت مواد پرتوزا، دوز دریافتی به بیش از ۱۰۰ میلی‌سیورت رسیده است. این مقدار دوز می‌تواند عواقب جدی برای سلامت داشته باشد. با توجه به اینکه محل انفجار منطقه شهری است، ضرورت ایجاد برنامه‌های فوری برای ارزیابی و مدیریت خطرات به وضوح محسوس است. مدل HYSPLIT به عنوان یک ابزار کلیدی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی نحوه انتشار مواد پرتوزا عمل کرده است. این مدل با ترکیب روش‌های لاگرانژی و اویلری، توانسته است دقت بالایی در

ارزیابی مسیر و غلظت آلاینده‌ها بصورت **minimum** و **maximum** ارائه دهد. برای صحنه گذاری الگوی پاشندگی بدست آمده از اجرای مدل **HYSPLIT** بهتر است از روشهای اندازه گیری دقیق تری مانند استفاده از مواد فلورسنت و رهاسازی آنها در محیط با آهنگ مشخص جهت تعیین میزان غلظت آلاینده ها در نقاط شبکه مورد بررسی استفاده شود. با این کار صحنه گذاری الگوی پاشندگی بجای کیفی بصورت کمی صورت گرفته و عدم قطعیت های حاصله قابل محاسبه خواهند بود. [(۱۸)] نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که داده‌های دقیق جوی و شرایط آب‌وهوایی لحظه‌ای برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها ضروری است. انتشار مواد پرتوزا نه تنها بر سلامت انسان بلکه بر اکوسیستم‌های محلی نیز تأثیر می‌گذارد. آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی، و همچنین تأثیرات درازمدت بر تنوع زیستی از جمله عواقب احتمالی چنین حوادثی است. این مطالعه تأکید می‌کند که باید مطالعات بیشتری در زمینه تأثیرات زیست‌محیطی به عمل آید تا بتوان به درک بهتری از پیامدهای ناشی از انتشار مواد پرتوزا رسید و راهکارهایی برای به حداقل رساندن این تأثیرات ارائه داد.

۵- تشکر و قدردانی

در این قسمت نویسندگان می‌توانند در صورت لزوم مراتب تشکر و قدردانی خود را از حامیان تحقیق که به صورت غیرمستقیم در پیشبرد آن نقش داشته‌اند، بیان کنند.

۶- تعارض منافع

نویسنده(گان) اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

۷- دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

۸- منابع

1. رضا و. محمد عماد غنخ، سید امیر حسین ف. بررسی پخش اتمسفری تشعشعات پرتوزای در سناریوی عملکرد عادی راکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از نرم افزار HYSPLIT. 2015.
2. فهیمه م. سمیه ک. مریم ا. ردیابی منابع گرد و غبار در سطوح مختلف جو تهران با استفاده از مدل HYSPLIT. 2016.
3. تیغ حنف. HYSPLIT شبیه سازی پخش مواد رادیواکتیو ناشی از بمب های هسته ای بانرم افزار. فصلنامه علمی ((دفاع هوافضایی)). ۱۴۰۱.
4. کاویانی، معماریان، کلانتری ا. شبیه سازی انتقال، پخش جوی و نهشت آلاینده های هسته ای رها شده از یک حادثه فرضی در نیروگاه بوشهر. فیزیک زمین و فضا. ۲۰۱۷، ۴۳(۳): ۶۳۵-۵۰.
5. زاده د. مهدوی، نوروزی، غلامی، حلی ساز، ارشک. بررسی مسیرهای انتشار گرد و غبار در استان هرمزگان با استفاده از مدل HYSPLIT مهندسی و مدیریت آبخیز. ۲۰۲۱، ۱۳(۲): ۴۳۱-۴۴.
6. محمود آبادی اسسهنز. شبیه سازی پراکنش آلاینده Cs137 زوددکش راکتور تحقیقاتی تهران در شرایط حادثه با استفاده از نرم افزار HYSPLIT. پژوهش های محیط زیست و کشاورزی ایران. ۱۳۹۴.
7. علیرضا صلحمند. شبیه سایی مسیرهای گرد و غباری برفراز ایران. ۱۳۹۱.
8. Moroz BE, Beck HL, Bouville A, Simon SL. Predictions of dispersion and deposition of fallout from nuclear testing using the NOAA-HYSPLIT meteorological model. *Health physics*. 2010;99(2):252-69.
9. Beck HL, Bouville A, Moroz BE, Simon SL. Fallout deposition in the Marshall Islands from Bikini and Enewetak nuclear weapons tests. *Health physics*. 2010;99(2):124-42.
10. Wendel CC, Fifield LK, Oughton DH, Lind OC, Skipperud L, Bartnicki J, et al. Long-range tropospheric transport of uranium and plutonium weapons fallout from Semipalatinsk nuclear test site to Norway. *Environment International*. 2013;59:92-102.
11. Rolph G, Ngan F, Draxler R. Modeling the fallout from stabilized nuclear clouds using the HYSPLIT atmospheric dispersion model. *Journal of environmental radioactivity*. 2014;136:41-55.
12. Suh K-S, Park K, Min B-I, Kim S, Jung Y. Development of the trajectory model for tracking release area of the radioactive materials. 2015.

13. Philippe S, Alzner S, Compo GP, Grimshaw M, Smith M. Fallout from US atmospheric nuclear tests in New Mexico and Nevada (1945-1962).:230711040. 2023.
14. Lisowski E. Potential Use of Low-Yield Nuclear Weapons in a Korean Context. *Journal for Peace and Nuclear Disarmament*. 2022;5:85-100.
15. Yao T, Thompson LG, Davis ME, Xu B, Wu G, Liang S, et al. Westerly drives long-distance transport of radionuclides from nuclear events to glaciers in the Third Pole. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022;255:107016.
16. <https://climatology.ir/>، وب سایت جامع هوا و اقلیم شناسی.
17. آبروش، صادق، محمدخان، ثروتی، قهرودی. مسیر یابی و بررسی روند حرکت منابع تولید گرد (مطالعه موردی: شرق HYSPLIT و غبار در شکل گیری تپه های ماسه ای با استفاده از مدل استان قم، ماسه زار جلالی). نشریه علمی-پژوهشی مرتع و آبخیزداری. ۲۰۲۱؛ ۷۴(۲): ۲۷۳-۲۸۶.
18. در شرایط بهره MW یوسفی پیش. بررسی پخش مواد رادیواکتیو از یک رآکتور هسته ای فرضی ۵. برداری عادی و بعد از وقوع حادثه در سطح شهر تهران. ۱۳۹۲.
19. <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>.